

Herr Dr. M. Levin-Göttingen:

EINIGE FOLGERUNGEN AUS DER HYPOTHESE DES ATOMZERFALLS.

A. Alter von Mineralien.

Das Studium der radioaktiven Erscheinungen hat, wie in den vorausgehenden Vorträgen ausgeführt wurde, zu der Vorstellung geführt, dass die radioaktiven Substanzen in neue Stoffe übergehen und selbst allmählich verschwinden. In einem ursprünglich homogenen, radioaktiven Präparat, z. B. reinem Radiumbromid, entstehen allmählich die Umwandlungsprodukte des Radiums. Sofern diese aktiv sind, werden sie gleichfalls durch Zerfall verschwinden, die inaktiven Produkte, die sich nicht mehr zersetzen, werden sich im Laufe der Zeit anhäufen. Solche inaktive, beständige Umwandlungsprodukte des Radiums sind das Helium und vielleicht auch das Blei. Wir besitzen nun radioaktive Präparate von sehr hohem Alter in den radiumhaltigen Mineralien und können aus dem Helium-, bzw. Bleigehalt dieser Mineralien ihr Alter berechnen, wenn die Geschwindigkeit bekannt ist, mit der Helium oder Blei aus dem Radium entstehen. Diese Berechnungsmethode ist zuerst von Rutherford¹⁾ angegeben und später von B. B. Boltwood²⁾ angewendet worden.

Die Geschwindigkeit, mit der Helium aus Radium entsteht, ist bisher nicht experimentell bestimmt worden³⁾, wir sind daher darauf angewiesen, diesen Wert auf rechnerischem Wege zu finden. Hierbei sind einige Voraussetzungen spezielleren Charakters zu machen, die zum Teil bereits in den vorausgehenden Vorträgen kurz erwähnt wurden, die hier jedoch noch kurz wieder zusammengestellt seien.

Für die Zerfallsperiode des Radiums liegt bisher nur ein experimentell bestimmter Wert vor, der sich in einer vorläufigen Mitteilung von Boltwood⁴⁾ findet. Nach den Versuchen von Boltwood zerfällt das Radium in ungefähr 3000 Jahren zur Hälfte. Theoretisch hat Rutherford die Lebensdauer des Radiums berechnet. Wenn man annimmt, dass jedes Atom des Radiums und seiner Umwandlungsprodukte unter Ausschleuderung von nur je einer α -Partikel zerfällt, und dass jede α -Partikel zwei Ionenladungen transportiert, so berechnet sich aus der Anzahl der vom Radium in einer Sekunde ausgesandten α -Partikeln, dass von 1 g Radium im Jahre $2,6 \times 10^{-4}$ g zerfallen, oder dass in 2600 Jahren das Radium zur Hälfte sich umwandelt; unter den gleichen Annahmen ergibt sich aus der Wärme-Entwicklung des Radiums ein Wert von 1600 Jahren. Schliesslich kann man noch

aus der vom Radium entwickelten Emanationsmenge die Lebensdauer des Radiums berechnen. Ramsay und Soddy¹⁾ fanden, dass 1 g Radium im Gleichgewichtszustande etwa 1 cmm Emanation abgibt. Auf dieser Grundlage ergibt sich für die Periode des Radiums ein Wert von 1050 Jahren. Die beiden letzteren Berechnungen sind mit gewissen Unsicherheiten behaftet, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann. Wir wollen im folgenden für die Periode des Radiums 2600 Jahre ansetzen. In dem vorausgehenden Vortrage sind die Gründe dargelegt worden, welche dafür sprechen, dass das Radium ein Zerfallsprodukt des Urans ist. Folgt man dieser Annahme, so kann man aus der Angabe von Rutherford und Boltwood²⁾, dass in Uranmineralien auf 1 g Uran $3,8 \times 10^{-7}$ g Radium enthalten sind, die Periode des Urans aus der des Radiums zu $6,85 \times 10^9$ Jahren berechnen.

Wie Herr Prof. Meyer ausgeführt hat, darf der Beweis, dass Helium aus Radium entsteht, als erbracht gelten, wenn auch die Frage, ob die α -Partikeln geladene Heliumatome sind, noch nicht entschieden ist. Schliessens wir uns der von Rutherford³⁾ als am wahrscheinlichsten angesehenen Annahme an, dass die α -Partikeln Heliumatome sind, die eine doppelte Ionenladung besitzen, so können wir auf Grund der oben gemachten Voraussetzungen die Geschwindigkeit berechnen, mit der Helium aus Radium entsteht, und wir finden, dass von 1 g reinem Radium im Jahre $1,0 \times 10^{18}$ Heliumatome oder 0,025 ccm Helium gebildet werden. Im Gleichgewichtszustande mit seinen Produkten bildet das Radium den fünffachen Betrag an Helium, da ausser dem Radium noch die Emanation, Radium A, C und F α -Partikeln aussenden. Von dem Uran ist bekannt, dass es α -Strahlen aussendet. Nehmen wir an, dass kein weiteres α -Strahlenprodukt zwischen Uran und Radium existiert, so würden also von 1 g Uran und der dem Gleichgewicht entsprechenden Menge von Radium $6 \times 0,025 \times 3,8 \times 10^{-7} = 6,25 \times 10^{-8}$ ccm Helium im Jahre gebildet werden, oder zur Bildung von 1 ccm Helium aus 1 g Uran würden 16 Millionen Jahre erforderlich sein.

Wählen wir als Beispiel eines radioaktiven Minerals, dessen Alter berechnet werden soll, das von Rutherford zuerst angezogene Mineral Fergusonit, das pro Gramm Uran 26 ccm Helium abgibt, so finden wir für das Alter des Fergusonits $26 \times 16 = 416$ Millionen Jahre. Aehnliche Werte

1) Rutherford, Radioaktivität (1907), 498 ff.

2) B. B. Boltwood, Phys. Zeitschr. 8, 97 (1907).

3) Vergl. den Vortrag von Prof. G. Meyer.

4) B. B. Boltwood, Phys. Zeitschr. 8 (1907).

1) Ramsay und Soddy, Proc. Roy. Soc. 53, 346 (1906).

2) Rutherford und Boltwood, Amer. Journ. Sci. 1906.

3) Rutherford, Phil. Mag., Sept. 1906.

erhält man für andere Uranmineralien, die eine Zersetzung nicht erfahren haben.

Wir wollen nun untersuchen, welchen Einfluss eine Aenderung in einigen der oben gemachten Annahmen auf diese Berechnung ausübt.

Nach den in früheren Vorträgen bereits erwähnten Versuchen von Mc Coy, Strutt und Boltwood entsteht das Radium in reinen Uranlösungen mit erheblich kleinerer Geschwindigkeit als theoretisch zu erwarten wäre. Rutherford¹⁾ hat zur Erklärung dieser Tatsache die Annahme gemacht, dass zwischen dem Uran sich Zwischenprodukte von sehr langsamer Umwandlung befinden, die möglicherweise eine oder mehrere α -Partikeln aussenden (vergleiche hierzu auch B.B. Boltwoods Versuche über die Entstehung des Radiums aus Aktinium, Phys. Zeitschr. 1907. Es würden dann von einem im Gleichgewichtszustande befindlichen Gramm Uran mehr als sechs α -Partikeln für je eine α -Partikel des Radiums ausgesandt werden. Wenn ferner bei strahlenlosen Umwandlungen²⁾ zwar α -Partikeln ausgesandt werden, jedoch mit so geringer Geschwindigkeit, dass die Luft durch sie nicht mehr ionisiert wird, so wird die Zahl der entstehenden Heliumatome noch grösser sein. Wäre die Zahl der von 1 g Uran ausgesandten α -Partikeln doppelt so gross, als wir angenommen haben, so würde das Alter der Mineralien nur die Hälfte des oben berechneten Wertes betragen.

Andererseits lässt die Berücksichtigung zweier anderer Umstände unsere Berechnung als zu niedrig erscheinen. Eine Korrektion in diesem Sinne würde man erhalten, wenn man der Tatsache Rechnung trägt, dass das Uran selbst nach der vorher berechneten Periode zerfällt. Ferner wird die von uns gemachte Annahme, dass das Helium quantitativ in den Mineralien sich aufspeichert, nicht zutreffend sein. Es wird auch aus den dichtesten Mineralien stets ein Teil des Heliums entweichen, so dass sich für das Alter des Minerals ein zu kleiner Wert ergibt.

Von Boltwood ist ähnlich wie der Heliumgehalt auch der Bleigehalt von Mineralien zur Berechnung ihres Alters herangezogen worden, unter der Annahme, dass Blei das Endprodukt der Umwandlung des Radiums ist³⁾. Auf diesem Wege fand Boltwood für das Alter der verschiedenen Uranmineralien Werte, die zwischen 400 und 2200 Millionen Jahren schwanken.

Die Daten, die diesen Berechnungen zu Grunde liegen, sind noch zu unsicher, als dass man hoffen könnte, bei dem gegenwärtigen Stande unseres Wissens mehr als die Grössenordnung der in Betracht kommenden Werte zu

treffen, es scheint jedoch nicht unwahrscheinlich, dass sich auf radioaktiven Messungen eine der genauesten Methoden zur Berechnung des Alters geologischer Formationen wird aufbauen lassen.

B. Bedeutung des Radiums für den Wärmehaushalt der Erde und der Sonne.

Die vorausgehenden Ueberlegungen führten zu einer Schätzung der Zeit, die mindestens verflossen ist, seit die Erde sich ungefähr in der jetzigen Beschaffenheit befunden hat. Das Alter der Erde, wie es sich aus dem Helium- oder Bleigehalt von Mineralien ergibt, befindet sich in Uebereinstimmung mit Berechnungen aus geologischen Daten. Betrachtungen über die Entstehung der Flusstäler durch Erosion und über die Bildung der grossen Salzablagerungen haben zu einer Schätzung des Alters der Erdkruste auf etwa 1000 Millionen Jahren geführt; und mit ähnlichen Werten glaubt man rechnen zu müssen, um die Schrumpfung der Erdoberfläche und die Evolution der Organismen zu erklären¹⁾.

Demgegenüber führen Berechnungen auf physikalischer Grundlage, wie sie zuerst von Helmholtz und Lord Kelvin aufgestellt worden sind, zu viel kleineren Zeiträumen. Die Temperatur der Erde nimmt von innen nach aussen ab, es muss also eine Leitung der Wärme aus dem Innern an die Oberfläche stattfinden. Die Wärmezufuhr, die die Erdoberfläche erfährt, muss, da die Temperatur an der Oberfläche merklich konstant bleibt, durch die Ausstrahlung von Wärme in den Weltenraum kompensiert werden. Lord Kelvin hat aus einem geschätzten Werte der Erstarrungstemperatur der Erdkruste, der geothermischen Tiefenstufe und der Wärmekapazität der Erdoberfläche berechnet, dass seit dem Beginn der Krustenbildung nur etwa 30 Millionen Jahre verflossen sein können. Ähnliche Betrachtungen gelten für die Sonne.

Bei diesen Berechnungen ist angenommen, dass weder die Erde, noch die Sonne eine merkliche Wärmezufuhr im Innern oder von aussen erfahren. Alle Versuche, die bisher gemacht wurden, um für den steten Wärmeverlust der Erde oder Sonne durch Strahlung eine Kompensation zu finden, haben nicht zum Ziele geführt. Es sei hier an den Versuch Robert Mayers erinnert, die Sonnenwärme aus dem Zusammenstoss der Sonne mit Meteoriten zu erklären, oder an Helmholtz's Berechnung der Temperaturzunahme, die die Sonne durch Kontraktion erfährt. Die Wärmezufuhr, welche die Sonne auf diesen Wegen erfahren könnte, reicht bei weitem nicht aus, um ihr Alter an die von der Geologie geforderte untere Grenze

1) Rutherford, Rad. Transformations, 159.

2) Rutherford, Radioaktivität, 566.

3) Vergl. d. vorst. Vortrag von O. Hahn.

1) Vergl. Sv. Arrhenius, Lehrbuch der kosmischen Physik, S. 285 ff. (1903).

zu rücken. Ferner würde keiner der uns bekannten chemischen Prozesse genug Wärme liefern, um den Wärmeverbrauch der Sonne für mehr als wenige tausend Jahre zu decken, selbst wenn es sich um Reaktionsquanten von der Grössenordnung der Sonnenmasse handelt.

Wir kennen jedoch jetzt in den radioaktiven Prozessen Reaktionen, die mit einer millionenmal grösseren Wärmetönung verlaufen, als irgend einer der rein chemischen Prozesse. Es liegt daher nahe, zu berechnen, welche Menge von Radium z. B. erforderlich wäre, um den Energiehaushalt der Sonne zu balancieren. Auf diese Möglichkeit wurde zuerst von Rutherford und Soddy hingewiesen¹⁾. Auf Grund der Langleyschen Konstanten (Strahlungsvermögen der Sonne = 828×10^6 cal pro Quadratcentimeter pro Stunde) berechnete W. E. Wilson²⁾, dass 3,6 g Radium im Kubikmeter der Sonne ausreichen würden, um den gesamten Wärmeverlust der Sonne zu decken; es ist jedoch bisher das Vorkommen von Radium auf der Sonne nicht spektroskopisch nachgewiesen.

Eine ähnliche Rechnung wie für die Sonne lässt sich für die Erde durchführen und kontrollieren. Von Rutherford³⁾ ist berechnet worden, wieviel Radium erforderlich wäre, um den Wärmeverlust, den die Erde durch Strahlung erfährt, zu decken. Setzt man die mittlere Leitfähigkeit der Erdkruste zu 0,004 und den Temperaturgradienten an der Erdoberfläche zu $0,00037^\circ$ pro Centimeter an, so ergibt sich, dass $2,2 \times 10^{-7}$ cal im Jahre in 1 ccm der Erde entwickelt werden müssen, um die Temperatur der Erde konstant zu halten. Da 1 g Radium im Jahre 876000 cal entwickelt, so sind $N = 2,6 \times 10^{-13}$ g Radium pro Kubikzentimeter der Erde ausreichend, um diese Wärmemenge zu liefern.

Rutherford⁴⁾ hat bereits an der Hand von Untersuchungen von Bodenproben von Elster und Geitel und von Eves Messungen des Emanationsgehaltes der Luft darauf hingewiesen, dass der Radiumgehalt der Erde mindestens so gross anzunehmen sei, als die Theorie erforderte. Neuerdings ist durch Strutt⁵⁾ das Versuchsmaterial durch sorgfältige und umfassende Messungen sehr vervollständigt worden. Strutt hat eine grosse Zahl von Gesteinen, besonders solchen, die einen erheblichen Teil der Erdkruste ausmachen dürften, auf ihren Radiumgehalt nach der Emanationsmethode untersucht. Fast alle Gesteine weisen einen gewissen Gehalt an Radium auf, der im Mittel etwa 8×10^{-12} g pro Kubikzentimeter beträgt, also das 30 fache

des von Rutherford berechneten Wertes. Von Eve¹⁾ ist kürzlich aus Messungen der durchdringenden Strahlung des Erdbodens in Montreal sogar ein noch etwa viermal grösserer Radiumgehalt des Erdbodens gefunden worden.

Die Konstanten, die der Berechnung Rutherfords zu Grunde gelegt sind, besitzen zwar, weil sie lediglich Mittelwerte darstellen, eine gewisse Unsicherheit, die jedoch kaum so gross sein dürfte, dass in ihr eine Erklärung für die Divergenz zwischen der Rechnung und den Messungen Strutts gefunden werden könnte. Es kommt ferner in Betracht, dass Strutt lediglich den Radiumgehalt untersucht hat, und dass zweifellos das Uran, Thorium und Aktinium gleichfalls einen bedeutenden Beitrag zur Wärmeentwicklung in der Erde geben werden, wie auch vielleicht die Radioaktivität der gewöhnlichen Materie eine nicht unbedeutende Rolle spielen wird. Es ist daher wahrscheinlich, dass die Wärmezufuhr, die die Erde durch den Zerfall radioaktiver Substanzen erfährt, noch grösser ist, als sich aus den Versuchen von Strutt ergibt. Wenn die Erde also in ihrem Innern dieselbe Zusammensetzung hätte, wie an der Oberfläche, so würde sie 30 mal mehr Radium enthalten und also 30 mal mehr Wärme entwickeln, als nötig wäre, um sie auf ihrer jetzigen Temperatur zu halten. Dieser Schwierigkeit ist Strutt durch die Annahme begegnet, dass nur $\frac{1}{30}$ des Erdvolumens einen hohen Radiumgehalt besitzt, d. h. dass dieser sich auf eine Oberflächenschicht von etwa 70 km Tiefe beschränkt, während der Kern fast frei von Radium ist.

Die Vorstellung einer festen Kruste von dieser Dicke befindet sich in Uebereinstimmung mit seismologischen Beobachtungen und den Folgerungen, die aus dem Temperaturgradienten zu ziehen sind.

Eine befriedigende Erklärung dafür, dass nur eine dünne Oberflächenschicht der Erde Radium enthalten sollte, ist bisher nicht gefunden worden. Es sei bemerkt, dass von Joly²⁾ die Vermutung ausgesprochen ist, dass das Radium durch den Lichtdruck der Sonnenstrahlen aus dem Weltenraum auf die Erdoberfläche und durch Niederschlagswasser in das Innere der Gesteine gelange. Diese Vorstellung besitzt zur Zeit wohl noch einen einigermaßen hypothetischen Charakter. Wenn für radioaktive Prozesse der zweite Hauptsatz der Thermodynamik Gültigkeit besässe, so wäre zu erwarten, dass im Innern der Erde nicht ein Zerfall, sondern ein Aufbau der radioaktiven Substanzen möglich wäre; der Zerfall des Radiums, der unter Volumvermehrung und Wärme-Entwicklung er-

1) Rutherford und Soddy, Phil. Mag., Mai 1903.

2) Wilson, Nature, Juli 1903.

3) Vergl. Radioaktivität, S. 506.

4) Vergl. Radioaktivität, S. 508.

5) Strutt, Proc. Roy. Soc. 77, 472 (1906).

1) Eve, Phil. Mag., Nov. 1906.

2) Joly, Nature, Januar 1907.

folgt, müsste bei den hohen Drucken und den hohen Temperaturen des Erdinnern rückgängig werden. Da über den Einfluss von Druck und Temperatur auf radioaktive Prozesse bisher nicht genug bekannt ist, lässt sich hierüber nichts Bestimmtes aussagen. Wir dürfen vielleicht

hoffen, dass der schnelle Fortschritt, der bisher der Entwicklung der Radioaktivität eigen gewesen ist, auch auf die vielen Fragen, die sich hier noch erheben, bald Antwort geben wird.

Göttingen, Institut für anorganische Chemie.

Herr Prof. Dr. F. Henrich-Erlangen:

DIE AKTIVITÄT DER LUFT UND DER QUELLWASSER.

Meine Herren! Es bleibt ein denkwürdiges Experiment in der Geschichte der Radioaktivität, das J. Elster und H. Geitel am Anfang dieses Jahrhunderts in Wolfenbüttel anstellten¹⁾. Ein längerer Kupferdraht war im Freien isoliert aufgehängt und auf ein hohes negatives Potential geladen worden. Nachdem man ihn mehrere Stunden in diesem Zustande der Luft ausgesetzt hatte, wurde er entladen und mit Leder abgerieben. Das Abgeriebene zeigte vorübergehend intensive Wirkungen auf die photographische Platte und das Elektroskop, Wirkungen, die nicht beobachtet wurden, wenn man den Draht vor der elektrischen Ladung abgerieben hatte. Ganz analoge Wirkungen auf photographische Platte und Elektroskop zeigte ein Metalldraht, wenn er im geladenen Zustande dem Einfluss radioaktiver Substanzen ausgesetzt wurde. Der Versuch Elsters und Geitels wurde häufig an den verschiedensten Orten mit dem gleichen Erfolge wiederholt und seitdem galt es als erwiesen, dass die Luft dauernd radioaktive Substanzen enthält. Die logische Verfolgung dieser Erscheinung führte zu den interessantesten Entdeckungen. Woher stammte diese Radioaktivität und welcher Natur war sie?

Indem sie den Ursachen nachgingen, fanden Elster und Geitel bald, dass Luft, die in Höhlen und geschlossenen Kellern stagniert, oder solche, die in den Kapillaren des Ackerbodens in innigster Berührung mit der Erde ist, weitaus mehr Radioaktivität aufweist als atmosphärische Luft²⁾. Die Bestandteile des Erdbodens schienen somit radioaktive Substanzen zu enthalten, und als man die Gesteine und Bodenarten daraufhin prüfte, fand man die kompakten Gesteine meist schwach, die tonhaltigen Bodenarten meist recht merklich und dauernd radioaktiv³⁾. Ja, Ackererde und Höhlenlehm aus Capri zeigten so beträchtliche Radioaktivität, dass man ihren Gehalt an Radium vermittelst der induzierten Aktivität feststellen konnte⁴⁾. So unglaublich es sich bei der

fast sprichwörtlich gewordenen Seltenheit radioaktiver Substanzen zuerst anhörte, die Untersuchungen von Elster und Geitel machten es wahrscheinlich, dass winzige Spuren von radioaktiven Substanzen fast überall auf der Erde vorhanden sind. Wie ein dünner Hauch durchsetzen sie die oberen Erdschichten, an manchen Stellen dichter, an anderen weniger dicht gelagert. Ausser dem Radium dürften auch radioaktive Edelerden weit verbreitet sein.

Einige der radioaktiven Substanzen geben fortwährend Emanation in winzigen Mengen ab, die sich infolge ihres gasförmigen Charakters der atmosphärischen Luft beimischt. Diese wird dann teils durch innigen Kontakt mit den festen radioaktiven Erdbestandteilen, teils durch die sich stets zersetzenden Emanationen in gewissem Betrage in Ionen gespalten. Barometrische Schwankungen und andere meteorologische Verhältnisse regulieren den Prozess der „Aktivierung der Luft“¹⁾.

Ausser Ionen enthält somit die atmosphärische Luft radioaktive Emanationen. Radiumemanation ist in ihr wegen ihrer relativen Dauerhaftigkeit immer nachweisbar²⁾. Aber auch für die Anwesenheit von Radiothorium (Thoriumemanation) hat man sichere Anhaltspunkte³⁾. Aktiniumemanation dürfte nur in unmittelbarer Nähe des Erdbodens nachweisbar sein, da sie sich in wenigen Sekunden zersetzt⁴⁾.

Kaum war das Vorkommen radioaktiver Emanationen in der Luft sichergestellt, als man

1) Siehe weiter Muñoz del Castillo, Ann. de la Soc. exp. de Fis. y Quim. **4**, 98, 119, 147 (1906); sowie von dem Borne, Zeitschr. d. geolog. Ges. **58**, 1 (1906).

2) Auch für die zu erwartenden Zerfallsprodukte der Emanationen hat man Anhaltspunkte; vergl. H. Mache und T. Bimmer, Physik. Zeitschr. **7**, 617 (1906) und Blanc, Philos. Mag. **13**, 378.

3) Vergl. Bumstead, Physik. Zeitschr. **5**, 504 (1904) und J. E. Burbank, ib. **6**, 436 (1905).

4) Ausführlicheres über die Radioaktivität der Luft findet man samt der zugehörigen Literatur in zwei Vorträgen Geitels, siehe Jahrb. f. Radioakt. u. Electronik **1**, 146 (1904), und Verhandlungen der deutschen physikalischen Gesellschaft **8**, 23 (1906). — Siehe auch die Arbeiten von Ebert und seiner Schüler in der Physik. Zeitschr. und a. a. O.

1) Physik. Zeitschr. **2**, 592 (1900/1901).

2) ib. **4**, 522 (1903).

3) ib. **5**, 11, 321 (1904).

4) Ber. d. Deutsch. chem. Ges. **38**, 132 (1905).